

有機物・微生物の宇宙曝露と宇宙塵・微生物の捕集（たんぽぽ）

| | |
|------|-----------------------------|
| 東京薬大 | 山岸明彦、横堀伸一、川口壽太郎、Yang Yinjie |
| 横浜国大 | 小林憲正、藪下さやか、藤崎健太 |
| 宇宙研 | 矢野 創、山下雅道、奥平恭子、長谷川直、岸本直子 |
| 筑波大 | 橋本博文 |
| 千葉大 | 田端 誠、河合秀幸 |
| 大阪大 | 中嶋 悟、癸生川陽子、鈴木彰子 |
| 福岡工大 | 三田 肇 |
| 岡山大 | 奈良岡浩 |
| 産総研 | 丸茂克美 |

TANPOPO: Astrobiology exposure and micrometeoroid capture

Akihiko Yamagishi, Shin-ichi Yokobori, Jutaroh Kawaguchi, Yang Yinjie

Tokyo University of Pharmacy and Life Sciences, 1432-1 Horinouchi, Hachioji-shi, Tokyo 192-0392

Kensei Kobayashi, Sayaka Yabushita, Kenta Hujisaki

Yokohama National University, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501

Hajime Yano, Masamichi Yamashita, Kyoko Okudaira, Nao Hasegawa, Naoko Kishimoto

ISAS/JAXA, 3-1-1 Yoshinodai, Sagamihara-shi, Kanagawa 229-8510

Hirofumi Hashimoto

Tsukuba University, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8573

Makoto Tabata, Hideyuki Kawai

Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8522

Satoshi Najima, Yoko Kebukawa, Akiko Suzuki

Osaka University, 1-1 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-0043

Hajime Mita

Fukuoka Institute of Technology, 3-30-1 Wajiro-Higashi, Higasiku-Ku, Fukuoka 811-0295

Hiroshi Naraoka

Okayama University, 3-1-1 Tsushima-Naka, Okayama 700-8530

Katsumi Marumo

AIST, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567

E-mail: yamagish@ls.toyaku.ac.jp

TANPOPO, dandelion, is the name of a grass whose seeds with floss are spread by the wind. We propose the analyses of interplanetary migration of microbes, organic compounds and meteoroids on ISS-JEM. Ultra low-density aerogel will be used to capture micrometeoroid and debris. Particles captured by aerogel will be used for several analyses after the initial inspection of the gel and tracks. Careful analysis of the tracks in the aerogel will provide the size and velocity dependence of debris flux. The particles will be analyzed for mineralogical, organic and microbiological characteristics. To test the survival of microbes in space environment, microbial cells will be exposed. Organic compounds are also exposed to evaluate the possible denaturation under the conditions. Aerogels are ready for production in Japan. Aerogels and trays are space proven. All the analytical techniques are ready.

「TANPOPO」（たんぽぽ、蒲公英、dandelion）は綿毛のついた種子を風に乗せて頒布し、その生息域を広げる多年草である。我々は、この名前のもと、ISS-JEM（国際宇宙ステーション・日本実験棟）上での微生物と生命材料となり得る有機化合物の天体間の移動の可能性の検討と微小隕石の検出および解析実験を提案する。我々は、超低密度エアロゲルを用いることで、微小隕石やその他の微粒子を捕集することが可能であると考えている。低軌道上で超低密度エアロゲルを一定期間曝露することで宇宙空間で微粒子を捕集する。エアロゲル表面と衝突トラック

の顕微観察の後、エアロゲルの様々な解析を行う。衝突トラックの詳細な検討により、ISS周辺のデブリのサイズと速度が明らかにできると期待される。エアロゲル中に残存した粒子に関して、鉱物学的、有機化学的、及び微生物学的な検討を行う。一方、宇宙環境下での微生物の生存可能性について検討するため、微生物を直接宇宙空間に曝露する実験も行う。同様に、宇宙環境下での有機化合物の変性の可能性を検討するため、有機化合物の宇宙空間への直接曝露実験も行う。これらの実験を行うための装置はす

べて受動的な装置であり、そのための装置の基本構造、装置回収後の解析法も、既に確立されている。

1. はじめに

生命の起源の議論のなかで、生命は地球と他の地球外天体との間を移動したという考え方、すなわち地球外に生命の起源を求める「パンスペルミア仮説、胚種広布仮説 (panspermia)」は、古くから主張されてきた(Arrhenius (1908); Crick (1981))。火星由来の隕石中に生物様の構造が見つけたことで、この仮説が再び脚光を浴びた。他方、地球上に生まれた生物が隕石の衝突や火山の巨大噴火により地球の重力を振り切り飛び出す可能性もある。こうした可能性を検討するため、我々はこれまで、高々度における航空機と気球を用いた微生物採集実験を行い、採集された微生物の解析を進めてきた。ISS を用いることで、微生物採集高度を地球周回低軌道 (約 400 km) にまで広げることができる。また、一旦地球から脱出した微生物が他の天体までの移動の間に宇宙空間環境で生存することができるのかをテストすることも重要な研究テーマである。そのため、我々は ISS 上での微生物の生存テストを行うことも提案する。

生命の起源に関して他の重要な問題として、有機化合物の前生物的生成がある。地球外および太陽系の外縁部は、有機化合物の前生物的生成の場である可能性がある。この可能性を検証するため、これまで様々なシミュレーション実験が行われてきた。惑星間微小粒子の直接採取実験を行うことで、この可能性を直接検証できる可能性がある。さらに、地球外で生成した有機化合物が宇宙空間の環境下でどの程度変成するのかを推定することも重要な研究課題である。この目的で、ISS 上で模擬複雑有機化合物を直接宇宙空間に曝露し、その変成過程と変成によって生じる物質の解析を行うことも提案する。

超低密度エアロゲルの開発は、この微粒子の捕集実験において極めて重要である。シリカエアロゲルは SiO_2 からなり、透明性が高い。エアロゲルはこれまで人工デブリや惑星間塵の採集に用いられてきた。ここで提案する ISS 実験では、我々は超低密度エアロゲルを開発し、ISS 上でのエアロゲルの曝露テストを進める。開発された超低密度エアロゲル性能をこの提案による実験で実証。これにより、太陽系内次世代サンプルリターンミッションでの利用可能性が示されるであろうと考えている。

我々のデブリ捕集ミッションにより、多様なデブリが捕集されることが期待される。その中には、人工衛星 (及び宇宙船) 由来の人工デブリ、ISS 由来のデブリ、微小隕石様粒子、地球からの微小粒子が含まれると考えられる。ISS 上で捕集されたこれらの多

様な微粒子の解析から、様々な重要な情報が得られるであろうと考えられる。

我々は、これらのサブテーマを包含するミッションを「TANPOPO」と命名した。これは、たんぽぽの綿毛のついた種子が風に乗って新天地に運ばれることを地球と地球以外の天体間で生命や生命の材料物質が移動することに擬えて命名したものである。以下、このミッションについてその概要を紹介する。

2. 微小隕石様粒子の ISS 上での捕集

隕石の観察と収集は惑星科学の研究の中で、その母天体の研究を行うために進められてきた。黄道帯のダスト雲は地球表面からも観察できる。宇宙塵は南極で採取されたアイスコアに見いだされている。惑星間ダスト粒子は航空機を使って成層圏で採取されている。また、地球周回低軌道上の人工天体の表面への微隕石衝突が報告されている。これらの粒子の解析から、それらの起源とそれらの母天体についての情報を得ることができる。しかし、これまでの微隕石解析では地球由来の汚染の可能性が完全に除外できない。そこで、汚染のないかつ、できる限り破壊されていない微小隕石の捕集が望まれる。

「TANPOPO」成功のかぎとなるのは、エアロゲルを使って行う粒子の非破壊的な捕集である。シリカエアロゲルは超低密度 (0.03g/cm^3 以下を製作可能) な非結晶 SiO_2 で、光学的に透明であり、超高速の微粒子捕集実験に最も適していると考えられる。エアロゲルタイルは、ISS-JEM 曝露部のいくつかの方向を向けて設置されることが望ましい。信号接続は、全部の曝露期間の間に必要としない。地球周回低軌道での 1 年以上の曝露の後、トレイは EVA 作業員によって手で回収され ISS 与圧したモジュールで密封され、ソユーズ/STS/CEV で地球に帰還する。しかし、インターフェースの構造は今後調整される必要がある。この調整は、開発期間以内で完了されなければならない。しかし、これらは十分可能であり、フェーズ A 研究の間に最終判断できると考えられる。

3. 微粒子捕集用エアロゲル

エアロゲルは、低いバルク密度・透明性・断熱性を備え、宇宙空間での超高速微粒子の非破壊採集に最適な素材であると考えられる。エアロゲルは EuReCa、ユーロミール、ODC、MPAC-SEED、スターダスト、その他で使用された。その意味でエアロゲルが宇宙で使用できることは証明されている。

我々は高エネルギー加速器研究機構 (KEK) および松下電工 (株) と共同でエアロゲルを開発してきた (Adachi et al. (1995))。現在では、密度 $0.01\text{-}1.2\text{g/cm}^3$ という広い範囲のエアロゲルを自在に製作できる (Tabata et al. (2005))。我々の製法によるエアロゲルは、国際宇宙ステーション上での宇宙塵およびスペ

ースダスト採集実験 (ISS-SM MPAC-SEED) において実際に使用された。

TANPOPO ミッションでは、軌道上で超高速微粒子を採集する際、いかに微粒子に加わる衝撃や熱変成を回避するかが重要である。すなわちエアロゲルの微粒子採集性能が、採集物の科学分析の成否の鍵を握る。そのため、現在我々の製法で製作可能な最低密度である 0.01g/cm^3 かそれ以下のエアロゲルを導入する。これまで宇宙で実際に運用されたエアロゲルの密度は、 0.03g/cm^3 前後である。この密度のエアロゲルは、実験装置への設置という観点では適切であるが、相対衝突速度 6km/s 以上における微粒子の非破壊採集としてはまだ不十分かもしれない。我々は現在、 0.03g/cm^3 未満の超低密度エアロゲルを装置にどのように装着するかについて検討している。その方法の候補のひとつは、適切な強度をもったエアロゲルのベース層と、微粒子捕集に必要な超低密度エアロゲル層を組み合わせることである。既に我々は、異なる密度を有する複層を一体としたエアロゲルの開発に成功している。

4. 宇宙空間での有機化合物の捕集

多種多様な有機化合物が隕石 (炭素質のコンドライト) と彗星のような地球外天体で見いだされてきた。Chyba と Sagan は地球外天体に由来する 100kt 以上の炭素が地球に届けられたと推定している (Chyba & Sagan (1992))。それは、地球の最初の生物誕生のための重要な炭素源であった可能性がある。惑星間塵 (IDP) の中の有機化合物は地球の生命の誕生に隕石と彗星由来の塵よりも大きく寄与した可能性がある。第一の理由として、彗星と隕石によってもたらされた有機化合物よりも多くの有機化合物が IDP によってもたらされたと考えられることである。第二に、彗星と隕石由来の有機化合物が地球衝突時に破壊されてしまう可能性が高いのに対し、IDP は非破壊的に地上に到達する可能性が高い点である。これまで、実際多くの IDP が深海や南極大陸で収集されたが、それらは地球で汚染されている可能性が高い。我々は、TANPOPO プロジェクトの一部として、有機化合物の分析のために、IDP の捕集を提案する。

この捕集実験の為に、超高速 IDP を非破壊的に捕集することができるかどうか最大の問題である。我々は、そのために超低密度エアロゲルを用いる計画である。我々は、ISAS/JAXA で 2 段式軽ガス銃を用いて、シミュレーション実験を行った。その結果、PSG (シリカゲル) に吸着した AABA (α アミノ酪酸) を衝突させたサンプルでは、ブランクに対して有意の AABA が検出された。しかし、AABA を単独で衝突させた場合には AABA は検出されなかった。この結果は、エアロゲルを用いたとしてもアミノ酸単独では衝突時に消失してしまう事を意味している。し

かし、無機的な基材に保護されたアミノ酸は検出が可能な程度に安定であることが示された。

5. 宇宙環境における有機化合物の変成

有機化合物がどのように実際の宇宙環境で変成するのには興味深い問題である。これまでも有機化合物の放射化学的および光化学物質的変成についての多くの実験が行われてきた。しかし、これらの実験は人工的光源あるいは放射線源が用いて行われた。そのうえ、(EUV) を透過する適当なウインドウの素材がないことから、地上実験では遠紫外線使用されなかった。宇宙空間での曝露実験も行われたが (例えば LDEF と BIOPAN)、曝露サンプルはウインドウで覆われており、宇宙 EUV はサンプルまで到達しなかった (Hegedüsa et al. (2006))。

我々は、ISS-JEM 曝露部で有機化合物を曝露させる計画である。暴露装置は、エアロゲルユニットに併置される。ここでは、金属基板の上へアミノ酸と「模擬星間有機化合物」を固定し、カバー無しで宇宙空間にダイレクトに曝露する計画である。模擬星間有機物質は、星間分子として存在する一酸化炭素、アンモニアと水に陽子照射することで作製する (Takano et al. (2007))。この計画では、宇宙放射線と EUV を含む紫外線が同時にサンプルに照射されることになる。この実験から彗星/隕石由来の有機化合物が IDP の内部でどのように変成するかについての情報を得ることが可能になる。

6. 宇宙空間での微生物捕集

高々度での微生物捕集実験はかなり古くから行われてきた。1936 年から 1976 年までに、気球、航空機と気象観測ロケットを使用して、高度 $3\text{--}58\text{km}$ までで微生物捕集が行われた (Rogers & Meier (1936); Bruch (1967); Imshenetsky et al. (1976))。これらの実験では、胞子を作る真菌類と、バチルス属やマイクロコッカス属の真正細菌が単離された。しかし、それらの実験は現代の分子生物学が急速な発展をする前のものであり、古典的な微生物分類学的な解析が成されたのみであった。微生物がどのくらいの高度まで至るかは現在不明である。しかしもし、微生物が現在検出されている高度よりも高い高度で見いだされるならば、そのことは生命の惑星間移動の可能性をより強く支持することとなる。

以前、我々は航空機を使って微生物捕集実験を行った。高度 $0.8\text{--}12\text{ km}$ で採取された微粒子サンプルから、微生物が分離培養され、その遺伝子の解析が行われた。これらの分離株は *Streptomyces* 属、*Bacillus* 属、*Paenibacillus* 属という胞子形成種と、*Deinococcus* 属に関連する種であることが明らかとなった。*Deinococcus radiodulans* は、最も放射線抵抗性を示す種として知られている。また、*D. radiodulans* は高い

紫外線耐性を示すことも知られている。そこで、我々は高々度で単離された分離株について紫外線耐性を検討した。分離株のうちの2つは、*Deinococcus radiodurans* に比肩あるいは凌駕する高い紫外線耐性を示した。高々度における紫外線量は、地表表面よりはるかに高い。従って、高々度分離株が高いUV抵抗性を示すことはきわめて妥当である。

我々は、気球を用いた微生物サンプリング実験も行った。大気を真空ポンプで吸引し、限外ろ過膜で濾過した。サンプリングは、フィルタの前に置かれる弁でコントロールした。およそ10 m³ (常大気圧下での体積に換算して) の大気を、20 から35kmまでの高度で吸引した。4種類の分離株が、気球サンプリング実験で得られた。、現在分離株の分析を進行中である。

さらに高い高度で微生物の捕集を行うために、我々はISS-JEMの微生物捕集実験を提案する。ISS上の微生物/微粒子捕集は、真空環境下で行うため、航空機/気球を使用した捕集実験とは全く異なる採集方法を必要とする。我々は、サンプリング実験のために超低密度エアロゲルを使う予定である。微生物がISS高度で存在するなら、それらは地球周回軌道速度を持たなければならない。エアロゲルに対する微生物の相対速度は、ISSの進行方向と微生物の進行方向に依存し、これらが正反対の場合に最高の値16km/sとなる。我々は、2段式軽ガス銃を使って、このような条件下での微生物サンプリングの可能性をテストした。我々は、微生物を含んだ粘土様鉱物モンモリロナイト粒子を用いて微生物の生存可能性をテストした。事前に蛍光色素で標識した微生物を含んだ粒子を2段式軽ガス銃で4 km/sまで加速し、エアロゲルに衝突させた。エアロゲルの蛍光顕微鏡観察により、蛍光を発する微小粒子がエアロゲルの衝突トラック内に見いだされた。現在、我々は蛍光粒子が我々が使った微生物に由来するものであるかを検討している。

7. 宇宙空間における微生物の生存可能性の検証

地球と火星を含む惑星間の微生物移動可能性を探るには、宇宙空間での微生物の生存可能性をテストする必要がある。このプロジェクトの一部として、我々は直接曝露実験によって宇宙空間での微生物生存可能性をテストすることを計画している。これまでいくつかの宇宙空間での微生物曝露実験が行われてきた(例えばNicholson et al. (2000); Hoeneck et al. (2001))。しかし、大部分の実験では、サンプルはEVUを吸収するカバーによって保持されており、微生物を直接曝露したわけではなかった。したがって、これらの実験では、光の微生物細胞への影響を過小評価している可能性がある。

またこれまでの曝露実験では、孢子形成細菌である*Bacillus* spp.が用いられた。孢子は極限環境に最も耐性を示す細胞形態である。他方、*Deinococcus radiodurans* のような真正細菌が紫外線とγ放射線に極めて強い耐性を示すことが知られている。最近、我々は真正細菌の複数の株を高度10 kmほどから単離した(板橋、Yang、横堀、山岸。投稿準備中)。これらの株は、紫外線に対して*D. radiodurans* より高い耐性を示した。このような極めて高いUV耐性を持つ微生物は高々度で生存する可能性がより大きい。

我々のプロジェクトでは、*D. radiodurans* と我々が新しく単離したUV耐性真正細菌を含む種々の微生物細胞を、曝露実験のために使用する予定である。これらの菌株に関して病原性は知られていない。また少なくともいくつかの遺伝子について塩基配列が明らかである。従って、回収後の解析でこれらの遺伝子の塩基配列を調べることで、回収された菌株が汚染による物なのかどうかを判断できる。宇宙空間では微生物は真空中で凍結乾燥された状態であろうと推定される。本実験では微生物細胞を粘土鉱物と混合し、あるいははしない状態で、金属板表面にうがった小さな穴の中で凍結乾燥する。凍結乾燥した細胞は、遮蔽カバーなしでも、金属プレートに強く結合することが期待される。細胞を、少なくとも1年間宇宙空間に曝露した後、地上に回収する。地上に帰還したサンプル中の微生物の生存を種々な方法で解析する。

8. 終わりに

TANPOPO ミッションの千葉大学グループは、超低密度エアロゲルを作成する技術を有する。同じ方法で作成した日本製のエアロゲルは既に、微粒子サンプリング実験のためにISS Russian Service モジュールで使われた。エアロゲルトレイの基本的なデザインは、JAXAによるMPAC-SEEDでもテストされた。TANPOPO ミッションは、全曝露期間に渡り、通信等の電力消費型の活動を必要としない。低地球周回軌道での1年以上の曝露の後、トレイはEVA乗員によって手動でISSに回収される。

TANPOPO ミッションチームは、細菌の分析、有機化合物分析と微小隕石分析においてすでに長い経験を持っている。従って、すべての解析手法は準備ができています。

引用文献

引用文献はBiol. Scie. Space.21.67-75(2007)を参考にされたい。